第41卷 第2期
2024年2月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 2
Feb. 2024

西藏易贡湖流域地表水水化学特征及其控制因素

邵 杰[1]， 杨欣杰[1]， 陈喜庆[1]， 滕 超[1]， 易锦俊[1]， 董美玲[1]， 张泽琛[1]，
曹 军[1]， 朱 宁[1]， 肖 登[1]， 孙思远[1]， 吕 菲[2]

（1. 中国地质调查局自然资源实物地质资料中心，河北 三河 065201；2. 国家川藏铁路技术创新中心，
四川 成都 610200）

摘 要： 为探究易贡湖流域地表水水化学特征及其控制因素，以藏东南易贡湖流域为研究对象，采集了26组地表水样，绘制了水样点主要离子线性变化趋势图、Gibbs图及Piper三线图等，运用相关分析、线性趋势分析、数理统计和离子比等方法。分析了研究区地表水主要离子特征及其控制因素，揭示了研究区地表水水中的主要物质来源。结果显示：易贡湖流域地表水阳离子主要为Ca^{2+}、Mg^{2+}，K^{+}和Na^{+}含量较低，4种阳离子的含量关系为：Ca^{2+}>Mg^{2+}>Na^{+}>K^{+}，阴离子主要为HCO_3^-、SO_4^{2-}和Cl^-，NO_3^-和F^-含量较低，阴离子含量关系为：HCO_3^- > SO_4^{2-} >Cl^-> NO_3^- >F^-，H_2SiO_3浓度值变化平稳，围绕6.9 mg·L^{-1}上下波动变化，pH值沿程变化平稳，在7.84~8.37之间，水体属于弱碱性。Ca^{2+}、Mg^{2+}和HCO_3^-是构成易贡湖流域地表水中的3种主要离子，水化学类型以HCO_3-Ca·Mg或HCO_3-Ca型为主。岩石溶滤作用是主要控制因素，阳离子交替吸附作用和蒸发浓缩作用均相当微弱，人为活动影响十分有限。

关键词： 水化学；相关性分析；物质来源；易贡湖流域

湖泊水体中的化学离子能够指示湖泊水体循环过程、湖泊流域水-岩作用和湖泊演化历史[1-2]。湖泊水体水化学特征主要受控于地形地貌、岩石风化、大气降水、径流和排泄等条件，湖泊水体水化学特征常用于分析和研究湖泊水循环过程、水化学控制因素和环境变迁等[3-4]。迄今为止，国内外众多学者[5-6]通过对湖泊流域水体主要离子和水化学特征研究揭示了湖泊流域水体离子组成主要受到气候变化、岩石风化及人类活动的影响[7-10]。

青藏高原是冰川、湖泊、多年冻土和江河源头的主要聚集区[11]。青藏高原湖泊分布众多，湖泊的生态功能作用较为明显，能够有效维持水环境容量、水化学循环和水生生物平衡。针对青藏高原湖泊流域水化学特征及其控制因素已有相关学者开展了分析研究[12]。王鹏等[13]对青藏高原打加芒错湖水的水化学特征及其盐化过程开展了分析研究；王海雷等[14]对青藏高原400多个湖泊的水化学特征和盐度的相关性开展了综合研究；张涛等[15]对然乌湖流域地表水主要离子特征及其控制因素进行了分析，揭示了地表水水中主要物质来源；王利杰等[16]对西藏山南地区沉错湖泊流域开展了高原湖泊及其补给河流与冰川径流的水化学特征研究，并探讨了影响主要离子组成的主控因素；郑绵平等[17]通过对盐湖水化学类型及其地带分布进行研究，揭示了水化学类型与矿物组合特征密切相关；李承鼎等[18]于2009—2020年对西藏34个湖泊水体中离子分布进行了分析。以上研究成果为本研究提供了很好的借鉴。鉴于堰塞湖成因的易贡湖流域地表水水化学特征及控制因素方面的研究鲜见报道，此次主要采用数理统计[19]和离子比[20]等方法研究易贡湖流域地表水化学演化过程及其物质来源。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

公元1900年，一场大型泥石流发生于易贡藏布

收稿日期： 2023-07-13； **修订日期：** 2023-11-01

基金项目： 中国地质调查局地质调查项目（DD20230138，DD20221814，DD20221814-01，DD20221814-02）；国家地下水监测工程运行与维护（河北省秦皇岛地下水与海平面综合监测站运行维护（2023））

作者简介： 邵杰(1989-)，男，硕士，工程师，主要从事水工环地质调查与研究工作. E-mail: shaojie@mail.cgs.gov.cn

通讯作者： 杨欣杰. E-mail: yxinjie@mail.cgs.gov.cn

左岸,倾泻而下的泥石流堵塞了易贡藏布,形成了一个巨大的堰塞湖,即易贡湖。易贡巨型大滑坡于2000年再次发生(图1)。易贡湖位于林芝地区波密县境内,下距318国道通麦大桥约25 km。易贡湖地处易贡藏布下游,易贡藏布和帕隆藏布下游均位于雅鲁藏布江大拐弯的北侧外围,该地区新构造运动十分强烈,导致地壳运动极其活跃。滑坡体岩性主要是喜马拉雅早期花岗岩体,滑源区以下主要由大理岩、砂岩、板岩等组成,沟内还广泛发育第四系松散堆积物,地质基础薄弱。在区域地质内动力及外动力共同作用下致使该地区成为山崩、滑坡、泥石流等山地灾害多发易发地区[21-24]。

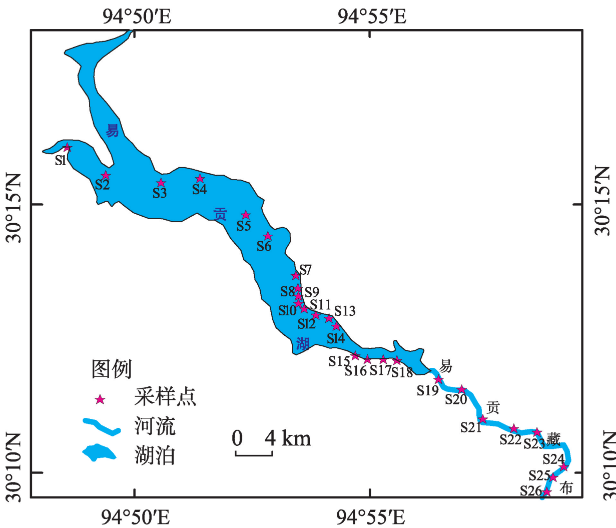


图1 易贡湖流域地表水采样点分布

Fig. 1 Distribution of surface water sampling points in Yigong Lake Basin

1.2 样品采集

为深入研究易贡湖流域地表水水化学特征及其控制因素,考虑到天气降水可能会对湖水水化学特征产生干扰,故集中采样期间尽量避开雨天,使采集的样品能够反映湖泊水体的本底值,最大限度增强水样的代表性。2022年10月在易贡湖流域沿湖水水流方向自上游至下游系统采集地表水样品26组(图1),采集的样品具体情况见表1。采集的样品经0.45 μm滤膜过滤后存放于干燥洁净的聚乙烯瓶中,并加入硝酸,使水样 pH<2,采集过程中对样品进行编号并记录其地理坐标和海拔高度,及时将样品运送实验室存放于4 ℃环境冷藏保存并进行测试。

1.3 测试及方法

采集的样品送至具有检测资质的自然资源部中国地质调查局自然资源实物地质资料中心实验室进行测试,样品测试方法均严格按照仪器测试要求规范进行操作,测试项目主要包括阳离子4种(Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+})、阴离子5种(Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、NO_3^-、F^-)、TDS、H_2SiO_3、pH共计12项。其中,样品阳离子Na^+、K^+、Ca^{2+}和Mg^{2+}采用火焰原子吸收光谱法测试分析(安捷伦240FS),阴离子采用离子色谱法Cl^-、SO_4^{2-}、NO_3^-、F^-[戴安(ICS-1100)]测定,HCO_3^-采用盐酸滴定法进行测定,H_2SiO_3采用硅钼蓝比色法测定,TDS采用蒸干法,测试完成后进行了电荷平衡误差计算,计算结果显示误差均在±5%之内,表明本次水

表1 易贡湖水样品采集情况

Tab. 1 Water sample collection table of Yigong Lake

编号	天气状况	水样类型	有无外界干扰	采样日期/年-月-日	编号	天气状况	水样类型	有无外界干扰	采样日期/年-月-日
S1	晴朗	湖水	无	2022-10-13	S14	晴朗	湖水	无	2022-10-15
S2	晴朗	湖水	无	2022-10-13	S15	晴朗	湖水	无	2022-10-15
S3	晴朗	湖水	无	2022-10-13	S16	晴朗	湖水	无	2022-10-15
S4	晴朗	湖水	无	2022-10-13	S17	晴朗	湖水	无	2022-10-15
S5	晴朗	湖水	无	2022-10-13	S18	晴朗	湖水	无	2022-10-15
S6	晴朗	湖水	无	2022-10-13	S19	晴朗	湖水	无	2022-10-15
S7	晴朗	湖水	无	2022-10-13	S20	晴朗	湖水	无	2022-10-15
S8	晴朗	湖水	无	2022-10-14	S21	晴朗	湖水	无	2022-10-16
S9	晴朗	湖水	无	2022-10-14	S22	晴朗	湖水	无	2022-10-16
S10	晴朗	湖水	无	2022-10-14	S23	晴朗	湖水	无	2022-10-16
S11	晴朗	湖水	无	2022-10-14	S24	晴朗	湖水	无	2022-10-16
S12	晴朗	湖水	无	2022-10-14	S25	晴朗	湖水	无	2022-10-16
S13	晴朗	湖水	无	2022-10-14	S26	晴朗	湖水	无	2022-10-16

化学测试数据可靠。根据地表水样品实验测试结果，利用Origin 2018绘制地表水主要成分线性趋势图、Piper三线图[25]及Gibbs图[26]，结合研究区实际地质、水文地质条件，采用数理统计及离子比等方法分析易贡湖流域地表水水化学分布特征及其控制因素。

2 结果与分析

2.1 主要离子组成

图2及图3显示26组水样主要测试项目沿程变化趋势，结果显示，阳离子主要以Ca^{2+}、Mg^{2+}为主，K^+和Na^+含量较低，Ca^{2+}含量变化范围为9.81～86.6 mg·L^{-1}，平均值为33.2 mg·L^{-1}，Mg^{2+}含量变化范围为0.77~10.90 mg·L^{-1}，平均值为6.16 mg·L^{-1}，Na^+含量变化范围为0.55~5.88 mg·L^{-1}，平均值为2.24 mg·L^{-1}，K^+含量变化范围为0.93~5.96 mg·L^{-1}，平均值为1.85 mg·L^{-1}，从平均值含量来看，4种阳离子的含量大小关系为：Ca^{2+}>Mg^{2+}>Na^+>K^+。阴离子主要以HCO_3^-、SO_4^{2-}和Cl^-为主，NO_3^-和F^-含量较低，HCO_3^-含量变化范围为15.7~184 mg·L^{-1}，平均值为83.11 mg·L^{-1}，SO_4^{2-}含量变化范围为8.05～122 mg·L^{-1}，平均值为40.94 mg·L^{-1}，Cl^-含量变化范围为5.28~6.74 mg·L^{-1}，平均值为5.58 mg·L^{-1}，NO_3^-含量变化范围为2.44~4.03 mg·L^{-1}，平均值为2.42 mg·L^{-1}，F^-含量变化范围为0.18~0.41 mg·L^{-1}，平均值为0.30 mg·L^{-1}，从平均值含量来看，5种阴离子含量大小关系为：HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^- >F^-。

2.2 主要离子空间变化特征

图2显示，阳离子Mg^{2+}、Na^+和K^+沿程离子浓度变化不大[27]，分别在6.2 mg·L^{-1}、2.2 mg·L^{-1}和1.8 mg·L^{-1}上下波动，而Ca^{2+}沿程浓度变化较大，呈现出先在32 mg·L^{-1}上下波动，再下降到最小值9.81 mg·L^{-1}，接着又连续上升至最大值86.60 mg·L^{-1}，最后持续下降至17.40 mg·L^{-1}。阴离子Cl^-、NO_3^-、F^-沿程离子浓度变化不大，分别在5.6 mg·L^{-1}、2.9 mg·L^{-1}和0.3 mg·L^{-1}上下波动，而HCO_3^-和SO_4^{2-}沿程离子浓度变化较大，HCO_3^-先是在84.9 mg·L^{-1}上下波动，进而上升至162 mg·L^{-1}，接着持续下降至最小值15.7 mg·L^{-1}，又上升至最大值184 mg·L^{-1}，最后持续下降，SO_4^{2-}沿程先是由65.3 mg·L^{-1}下降至27.7 mg·L^{-1}，进而稳定在44.1 mg·L^{-1}，接着下降至最小值8.57 mg·L^{-1}，在有升有降中上升至最大值122 mg·L^{-1}，最后呈

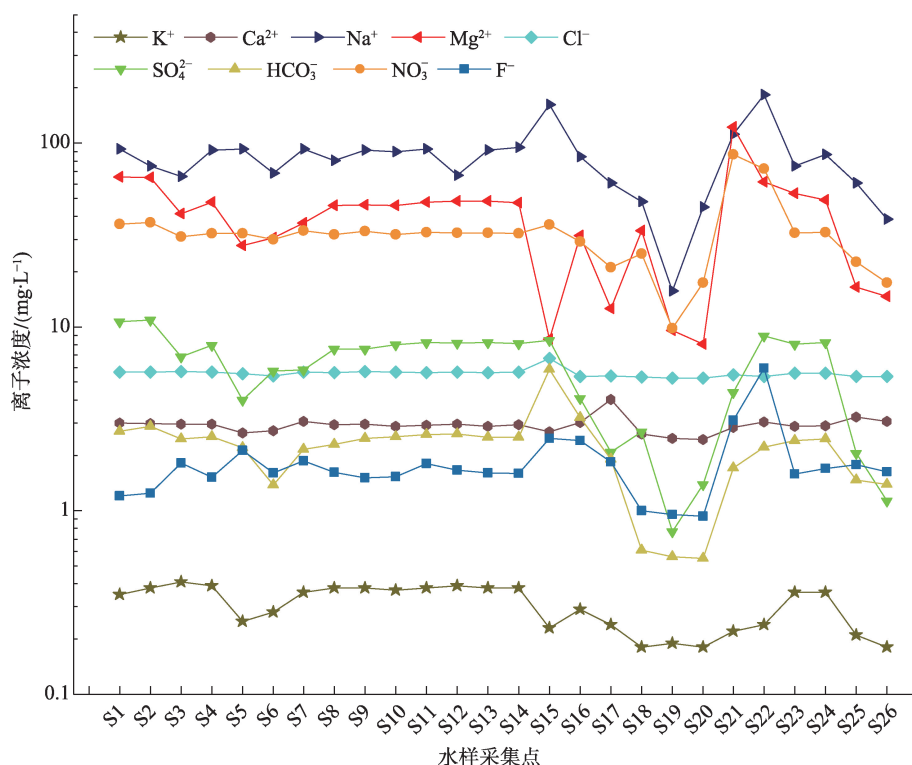


图2 易贡湖流域地表水主要阴阳离子浓度上游至下游变化趋势

Fig. 2 Variation trend of the concentration of cationic ions in surface water from upstream to downstream in Yigong Lake Basin

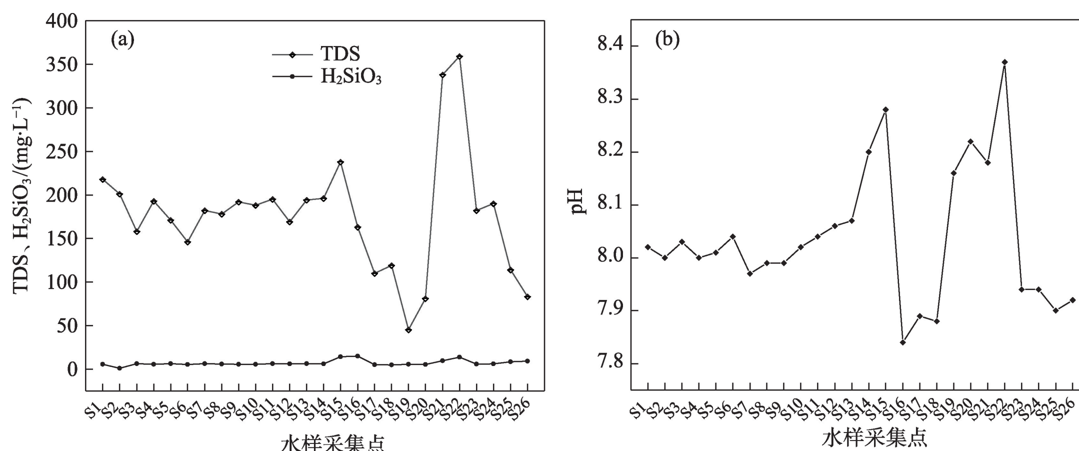


图3　易贡湖流域地表水TDS、H_2SiO_3及pH上游至下游变化趋势

Fig. 3 Variation trend of TDS, H_2SiO_3 and pH of surface water from upstream to downstream in Yigong Lake Basin

现持续下降的趋势。易贡湖流域地表水演化规律为主要阴阳离子浓度在一定区间内变化,而个别阴阳离子浓度随流经位置变化较大,主要和流经的岩石成分和流动速率有关。

2.3　TDS、H_2SiO_3及pH空间变化特征

易贡湖流域26组地表水H_2SiO_3浓度值变化不大,呈现出围绕6.9 mg·L^{-1}上下波动变化。TDS浓度值自上游至下游随径流路径先是在186.4 mg·L^{-1}上下波动变化,然后下降至最小值45.3 mg·L^{-1},接着持续上升至最大值359.0 mg·L^{-1},最后呈现出持续下降的趋势,TDS值区域上偏大。据野外调查发现,沿湖周围以灰岩和大理岩为主,使得湖水溶解较多可溶岩成分,导致湖水矿化度偏高。pH值沿程变化平稳,在7.84~8.37之间,水体属于弱碱性。TDS、H_2SiO_3及pH空间变化特征具体见图3。

2.4　水化学类型

Piper三线图能够表征流域地表水水化学演化及水化学类型[28-31],将易贡湖流域采集的26组地表水样品主要离子的摩尔浓度百分比(mol%)点投落在Piper三线图上(图4),结果显示,阳离子中,Ca^{2+}占据绝对优势,其次是Mg^{2+}。阴离子中,HCO_3^-占据绝对优势。显然,Ca^{2+}、Mg^{2+}和HCO_3^-是构成易贡湖流域地表水中的3种主要离子,据此判断其水化学类型为HCO_3-Ca型或HCO_3-Ca·Mg型。

2.5　主要离子相关性分析

相关性分析是研究水化学演化中离子来源的常用方法,组分来源相同的相关性较强,反之,则相关性较差[32-33]。相关性结果表2显示,TDS与Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、HCO_3^-、SO_4^{2-}相关关系较强。其中,TDS与Ca^{2+}和HCO_3^-的相关系数分别为0.936、0.886,说明TDS与Ca^{2+}和HCO_3^-之间具有显著的相关关系,也说明Ca^{2+}和HCO_3^-是易贡湖流域TDS的主要贡献者。HCO_3^-与Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+及K^+均有着显著的相关关系,说明物质来源相同,通常来源于灰岩等碳酸盐岩的风化溶解。SO_4^{2-}与Ca^{2+}、Mg^{2+}也有着较强的相关关系,说明这三者物质来源也相同,通常来源于方解石和灰岩等碳酸盐岩矿物的风化溶解及硫酸溶解。TDS与F^-相关系数为0.267,表明F^-与TDS相关性较差,F^-对TDS的贡献较小。相关研究表明,常见的含氟量较高的矿物包括萤石、冰晶石、细云母、氟磷灰石、锂云母、角闪石、白云母、氟钨矿等,这些矿物在花岗质岩石和高级变质岩如片麻岩中含量最为丰富,而易贡湖研究区主要岩性为大理岩、砂岩及板岩,F^-在地表水中含量较低与实际地质条件相吻合[34]。

3　讨　论

3.1　控制因素

3.1.1　水-岩相互作用分析　自然水中的水文地球化学过程可通过制作Gibbs图揭示[35-36],根据TDS与Na^+/Na^++Ca^{2+}或$Cl^-/Cl^-+HCO_3^-$的关系可分为3种控制类型,分别为大气降水控制型、岩石溶滤控制型和蒸发浓缩控制型。将26组地表水样品的TDS与Na^+/Na^++Ca^{2+}和TDS与$Cl^-/Cl^-+HCO_3^-$投射到Gibbs图

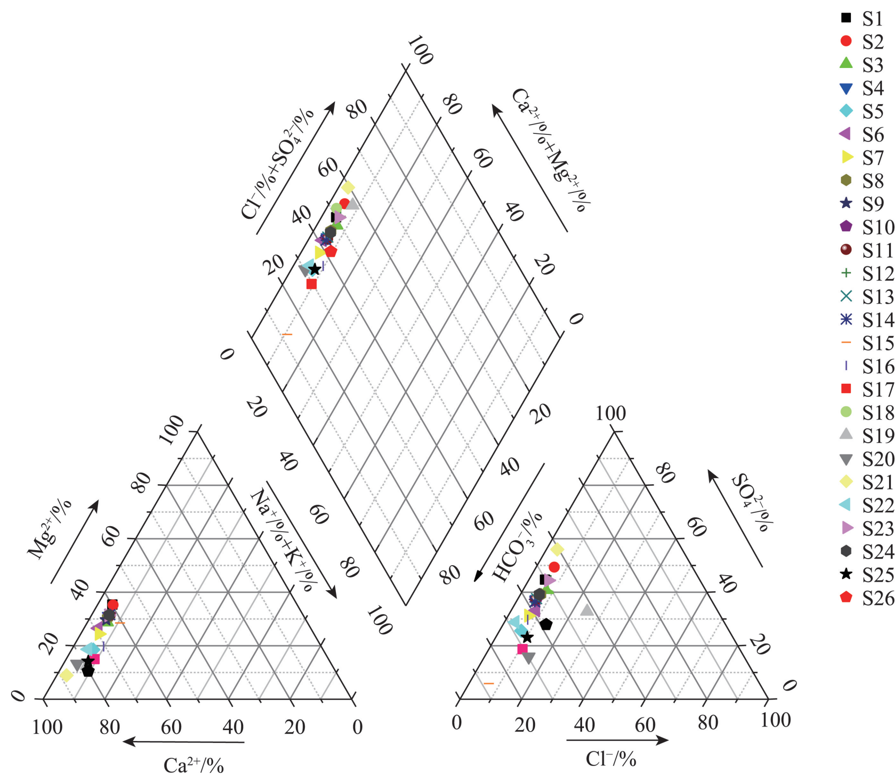


图4 易贡湖流域地表水样品主要离子Piper三线图

Fig. 4 Piper triplex diagram of main ion in surface water samples from Yigong Lake Basin

表2 主要离子之间的相关性分析关系

Tab. 2 Correlation analysis between major ions

	K^+	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	F^-	TDS
K^+	1.00	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ca^{2+}	0.745*	1.00	–	–	–	–	–	–	–	–
Na^+	0.228	0.220	1.00	–	–	–	–	–	–	–
Mg^{2+}	0.171**	0.393*	0.638	1.00	–	–	–	–	–	–
Cl^-	0.024**	0.123	0.892	0.549*	1.00	–	–	–	–	–
SO_4^{2-}	0.323**	0.827	0.089	0.528**	0.004	1.00	–	–	–	–
HCO_3^-	0.772	0.726	0.665	0.590**	0.543	0.391*	1.00	–	–	–
NO_3^-	0.171	0.018**	0.117	0.008	−0.072	−0.003	0.052	1.00	–	–
F^-	−0.167	0.062**	0.409*	0.782	0.324	0.388	0.167	0.145	1.00	–
TDS	0.734*	0.936**	0.476	0.640**	0.349	0.768**	0.886**	0.039	0.267	1.00

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关;*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

上(图5),可发现几乎所有的水样点均落在岩石溶滤控制型区域。据此判断易贡湖流域地表水主要受岩石溶滤作用控制[37]。

蒸发浓缩作用的直接结果是导致矿化度的增加。易贡湖流域地形高差较大,河流流速较快,从Gibbs图可看出,其所有水样点均远离蒸发浓缩作用控制区域,故蒸发浓缩作用在易贡湖流域地表水水文地球化学过程中极其微弱,可忽略不计[38]。

采用大气降水作为基线,将采集的水样点投射到Ca/Na与TDS的对数模型中,可用来研究大气环流和岩石风化等对水化学组分的控制[39]。在研究区采集的两组雨水,其Ca^{2+}、Na^+和TDS的平均值分别为1.94 mg·L^{-1}、0.12 mg·L^{-1}和14.50 mg·L^{-1}。所采集的水样点均落在岩石风化区域(图6),此结论与运用Gibbs图的结果是一致的。此外,含钠岩石与含钙岩石共同风化溶解影响研究区水化学组分。

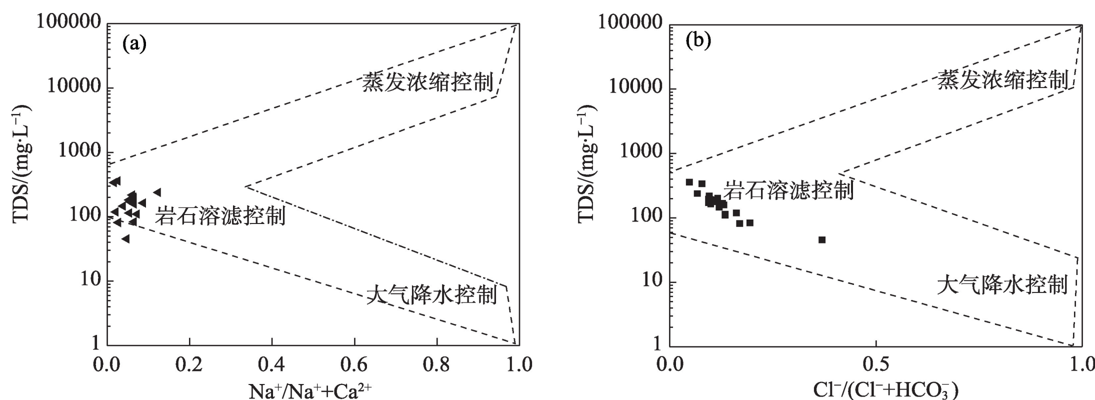
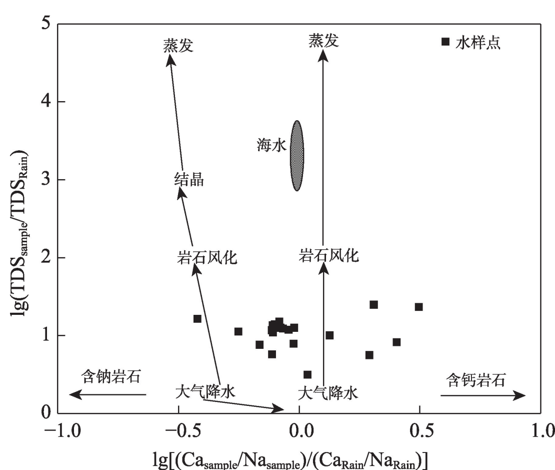


图5　易贡湖流域地表水样品Gibbs图

Fig. 5　Gibbs map of surface water samples in Yigong Lake Basin

相关研究表明[40],水体中的Ca^{2+}、Mg^{2+}多数来源受控于碳酸盐岩、蒸发岩和硅酸盐岩的风化溶解作用,水体中的Na^+、K^+多数来源受控于硅酸盐岩与蒸发岩的风化溶解作用,水体中的HCO_3^-多数来源受控于碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化溶解作用,水体中的SO_4^{2-}、Cl^-多数来源受控于蒸发岩的溶解作用,岩石溶滤作用产生的离子来源可以运用混合图进行揭示。由于Mg^{2+}/Na^+、Ca^{2+}/Na^+和HCO_3^-/Na^+与水流流速、稀释和蒸发作用无明显关系,故可用Ca^{2+}/Na^+与Mg^{2+}/Na^+和Ca^{2+}/Na^+与HCO_3^-/Na^+之间的关系揭示易贡湖流域地表水水化学的成因过程,以此揭示水体中Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}和HCO_3^-等主要离子来源于何种矿物的风化溶解。图7显示,易贡湖流域地表水样点



注:Ca_{sample}/Na_{sample}表示湖水样钙与钠浓度比值;Ca_{Rain}/Na_{Rain}表示雨水样钙与钠浓度比值;TDS_{sample}/TDS_{Rain}表示湖水样与雨水样溶解性总固体浓度比值。

图6　易贡湖流域水样点Ca-Na-TDS关系

Fig. 6　Ca-Na-TDS relationship of water sample points in Yigong Lake Basin

均落在硅酸盐岩与碳酸盐岩之间,且更靠近碳酸盐岩,说明易贡湖流域地表水主要离子是受到硅酸盐岩溶滤和硅酸盐岩溶滤等水–岩相互作用影响,且碳酸盐岩溶滤作用更强[41–42]。此外,研究表明,水中的偏硅酸(H_2SiO_3)多数来源于硅酸盐岩的风化脱硅溶滤作用,极少直接来源于晶质二氧化硅的水合作用。本研究中地表水中的H_2SiO_3含量为6.9 mg·L^{-1},含量较低,该结果与易贡湖流域地表水样点均落在硅酸盐岩与碳酸盐岩之间,水–岩作用中硅酸盐岩溶滤作用相对较弱相吻合[43]。

3.1.2　阳离子交替吸附　阳离子交替吸附作用是指颗粒将吸附水中某些阳离子,而将其原来吸附的部分阳离子转化为水中组分的过程[44]。Na^+与Cl^-是否发生交换可以用$[(2SO_4^{2-}+HCO_3^-)-2(Ca^{2+}+Mg^{2+})]$(mmol·L^{-1})进行判断。其判断依据主要取决于$(Na^+-Cl^-)/[(2SO_4^{2-}+HCO_3^-)-2(Ca^{2+}+Mg^{2+})]$(mmol·L^{-1})比值是否位于1:1线附近,若二者比值处于1:1线附近,认为其水文地球化学过程中阳离子交替吸附作用较强,若二者比值远离1:1线,则认为其水文地球化学过程中阳离子交替吸附作用较弱。图8a中所有样品的$(Na^+-Cl^-)/[(2SO_4^{2-}+HCO_3^-)-2(Ca^{2+}+Mg^{2+})]$(mmol·L^{-1})比值均远离1:1线,据此判断易贡湖流域地表水的阳离子交替吸附作用极其微弱[45]。

3.1.3　人类活动影响　地表水流域水文地球化学演化过程深刻受到人类活动的影响和控制。地表水中NO_3^-、Cl^-和SO_4^{2-}在人类活动强烈地区会显著增加,自然过程中的Cl^-、SO_4^{2-}可能来源于石膏和盐岩的溶解或者是硫化物的氧化。通常,当地表水受到人为活动影响时,Cl^-/Na^+和NO_3^-/Na^+之间的比值会显著上升[46]。易贡湖流域地表水NO_3^-/Na^+比值较

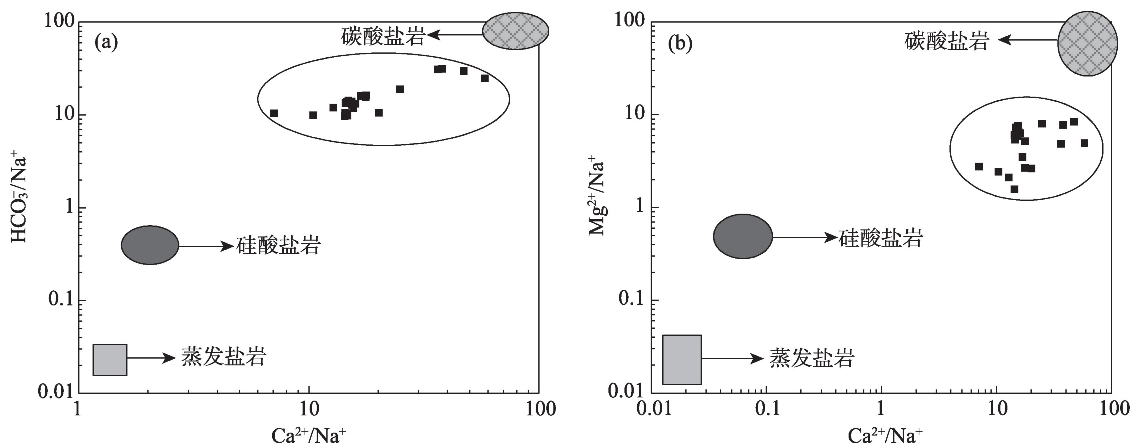


图7 易贡湖流域地表水样品 Ca^{2+}/Na^+ 与 Mg^{2+}/Na^+、HCO_3^-/Na^+ 关系

Fig. 7 Relationship between Ca^{2+}/Na^+ and Mg^{2+}/Na^+ and HCO_3^-/Na^+ in surface water samples from Yigong Lake Basin

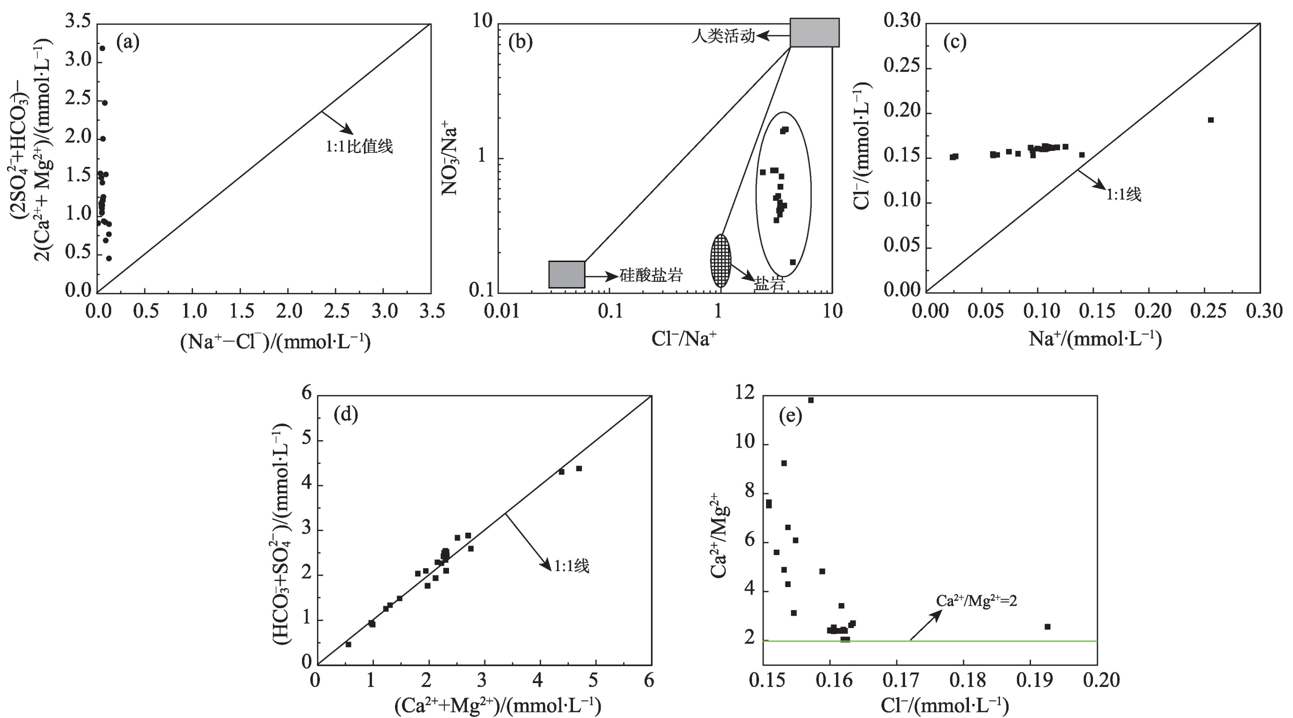


图8 易贡湖流域地表水样品相关离子关系

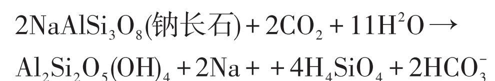
Fig. 8 Correlation ion relationship of surface water samples in Yigong Lake Basin

小,而 Cl^-/Na^+ 稍微偏大(图8b),据此判断当地人类活动对地表水水文地球化学过程有一定的影响,但影响有限,不是主要因素,主导因素还是自然条件下的水文地球化学演化[47]。

3.2 主要离子来源

盐岩的风化溶解作用释放的 Na^+ 与 Cl^- 浓度相同[48]。结果显示,研究区湖水采样点水体中的 Na^+/Cl^- 均远离1:1线,且绝大多数都靠近 Cl^- 一侧(图8c)。总体上,Cl^- 浓度大于 Na^+ 浓度,由前文分析可知,人类活动对易贡湖流域地表水水文地球化学演化过程产生一定的影响,但影响有限,所以多出来的 Cl^- 是由于人类活动造成的[49]。

研究区湖水采样点水体中的 Na^+ 来源于硅酸盐岩的风化溶解,其风化溶解具体过程为:



$$2NaAlSi_3O_8(钠长石) + 2CO_2 + 11H^2O \rightarrow$$
$$Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2Na+ + 4H_4SiO_4 + 2HCO_3^-$$

Mg^{2+}+Ca^{2+} 与 $SO_4^{2-} + HCO_3^-$ 之间的关系可用来判断该区水化学特征是受控于碳酸盐岩的风化溶解,

还是受控于石膏的风化溶解[50-51]。可用采样点水体中(SO_4^{2-} + HCO_3^-)/(Mg^{2+}+Ca^{2+})的摩尔浓度比值进行判定，若二者比值为1:1，则说明采样点水体中水化学受碳酸盐岩或石膏的溶解控制。结果显示，研究区采样点水体中的(SO_4^{2-} + HCO_3^-)/(Mg^{2+}+Ca^{2+})的摩尔浓度比值为1:1或者接近1:1（图8d），据此可判断，研究区地表水水化学主要受控于碳酸盐岩或石膏的溶解控制[52]。

通常，水体中Ca^{2+}和Mg^{2+}的来源可运用Ca^{2+}与Mg^{2+}之间的比值来揭示。若Ca^{2+}/Mg^{2+}比值为1，说明水体中的Ca^{2+}和Mg^{2+}来源于白云岩的溶解，若Ca^{2+}/Mg^{2+}比值介于1~2，说明Ca^{2+}和Mg^{2+}有更多方解石的溶解，若Ca^{2+}/Mg^{2+}比值大于2，说明有硅酸盐岩或石膏的溶解来提供Ca^{2+}。图8e显示，研究区采样点水体中Ca^{2+}/Mg^{2+}比值均大于2，据此可判断，研究区水体中有硅酸盐岩或石膏的溶解[53-54]。碳酸盐岩风化溶解的具体过程为[55-56]：


$$CaCO_3+CO_2+H_2O \rightarrow Ca^{2+}+2\ HCO_3^-$$


$$CaMg(CO_3)_2+2CO_2+2H_2O \rightarrow Ca^{2+}+Mg^{2+}+4\ HCO_3^-$$

综上所述，研究区水体中的主要离子来源于碳酸盐岩或石膏溶解。

4　结　论

（1）研究区地表水阳离子Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+及K^+平均值分别为33.20 mg·L^{-1}、6.16 mg·L^{-1}、2.24 mg·L^{-1}及1.85 mg·L^{-1}，4种阳离子的含量大小关系为：Ca^{2+}>Mg^{2+}>Na^+>K^+。阴离子HCO_3^-、SO_4^{2-}、Cl^-、NO_3^-及F^-平均值分别为83.11 mg·L^{-1}、40.94 mg·L^{-1}、5.58 mg·L^{-1}、2.42 mg·L^{-1}及0.30 mg·L^{-1}，5种阴离子含量大小关系为：HCO_3^- > SO_4^{2-} >Cl^-> NO_3^- >F^-。H_3SiO_2浓度值变化不大，呈现出围绕6.9 mg·L^{-1}上下波动变化特征。pH值在7.84~8.37之间变化，水体偏弱碱性。

（2）研究区地表水水化学类型以HCO_3−Ca或HCO_3−Ca·Mg为主，TDS与Ca^{2+}和HCO_3^-的相关系数分别为0.936、0.886。HCO_3^-与Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+及K^+物质均来源于灰岩等碳酸盐岩的风化溶解。SO_4^{2-}与Ca^{2+}、Mg^{2+}物质均来源于方解石或灰岩等碳酸盐岩矿物的风化溶解或硫酸溶解。

（3）研究区地表水(SO_4^{2-} + HCO_3^-)/(Mg^{2+}+Ca^{2+})的摩尔浓度比值为1:1或者接近1:1，说明受到碳酸盐岩或石膏的溶解控制，Ca^{2+}与Mg^{2+}比值均大于2，说明受到硅酸盐岩或石膏的溶解控制。

（4）研究区地表水水化学主要控制因素为岩石溶滤作用，且水化学组分受到含钠岩石与含钙岩石共同风化溶解影响，阳离子交替吸附作用和蒸发浓缩作用均相当微弱，研究区水文地球化学演化过程以自然演化过程为主，人类活动影响强度极其微弱。

参考文献（References）：

[1] 张丽, 陈永金, 刘加珍, 等. 东平湖水化学特征及成因分析[J]. 环境化学, 2021, 40(5): 1490−1502. [Zhang Li, Chen Yongjin, Liu Jiazhen, et al. Analysis on hydrochemical characteristics and causes of Dongping Lake[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(5): 1490−1502.]

[2] 刘智琦, 潘保柱, 韩谞, 等. 青藏高原湖泊水环境特征及水质评价[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5073−5083. [Liu Zhiqi, Pan Baozhu, Han Xu, et al. Water environmental characteristics and water quality assessment of lakes in Tibetan Plateau[J]. Enviromental Science, 2022, 43(11): 5073−5083.]

[3] 吴通航, 刘海燕, 张卫民, 等. 鄱阳湖流域赣江下游水化学特征及人类健康风险评价[J]. 现代地质, 2022, 36(2): 427−438. [Wu Tonghang, Liu Haiyan, Zhang Weimin, et al. Hydrocheemical characteristics and human health risk assessment in downstream Ganjiang River of the Poyang Lake Basin[J]. Geoscience, 2022, 36(2): 427−438.]

[4] 寇永朝, 华琨, 李洲, 等. 泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3142−3149. [Kou Yongchao, Hua Kun, Li Zhou, et al. Major ionic features and their possible controls in the surface water and groundwater of the Jinghe river[J]. Environmental Science, 2018, 39(7): 3142−3149.]

[5] Chunlu J, Chenghong J, Junzhen Z, et al. Water chemistry and stable isotope characteristics of subsidence lakes in coal mining areas, Eastern China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(15): 67−72.

[6] 邵杰, 李瑛, 滕超, 等. 新疆赛里木湖水化学及氢氧同位素特征分析[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(22): 42−44. [Shao Jie, Li Ying, Teng Chao, et al. Hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopic characteristics of Sayram lake in Xinjiang Autonomous Region[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2022, 50(22): 42−44.]

[7] Pant P P, Zhang F, Rehman F U, et al. Spatiotemporal variations of hydrogeochemistry and its controlling factors in the Gandaki River Basin, Central Himalaya Nepal[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622: 770−782.

[8] Fu C C, Li X Q, Ma J F, et al. A hydrochemistry and multi-isotopic study of groundwater origin and hydrochemical evolution in the middle reaches of the Kuye River Basin[J]. Applied Geochemistry, 2018, 98: 82−93.

[9] Mohanty A K, Rao V V S G. Hydrogeochemical, seawater intrusion

and oxygen isotope on a coastal region in the Puri District of Odisha, India[J]. Catena, 2019, 172: 558–571.

[10] Yang Z Y, Huang P H, Ding F F. Groundwater hydrogeochemical mechanisms and the connectivity of multilayer aquifers in a coal mining region[J]. Mine Water and the Environment, 2020, 39(4): 808–822.

[11] 白占学, 马剑飞. 亚洲水塔 青藏高原[J]. 自然资源科普与文化, 2021(1): 24–27. [Bai Zhanxue, Ma Jianfei. Asian water tower the Tibetan Plateau[J]. Scientific and Cultural Popularization of Natural Resources, 2021(1): 24–27.]

[12] 闫露霞. 青藏高原湖泊与湿地水化学特征及其物质来源[D]. 兰州: 西北师范大学, 2019. [Yan Luxia. Hydrochemical Characteristics and Material Sources of Lakes and Wetlands in Qinghai-Tibet Plateau[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2019.]

[13] 王鹏, 尚英男, 沈立成, 等. 青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 874–881. [Wang Peng, Shang Yingnan, Shen Licheng, et al. Characteristics and evolution of hydrochemical compositions of freshwater lake in Tibetan Plateau[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 874–881.]

[14] 王海雷, 郑绵平. 青藏高原湖泊水化学与盐度的相关性初步研究[J]. 地质学报, 2010, 54(10): 1517–1522. [Wang Hailei, Zheng Mianping. Preliminary study of the correlation between hydrochemistry and salinity of lakes in the Qinghai-TibetanPlateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 54(10): 1517–1522.]

[15] 张涛, 王明国, 张智印, 等. 然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4003–4010. [Zhang Tao, Wang Mingguo, Zhang Zhiyin, et al. Hydrochemical characteristics and possible controls of the surface water in Ranwu Lake Basin[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4003–4010.]

[16] 王利杰, 曾辰, 王冠星, 等. 西藏山南地区沉错湖泊与径流水化学特征及主控因素初探[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4): 737–745. [Wang Lijie, Zeng Chen, Wang Guanxing, et al. Chemical characteristics and impact factors of the Drem-tso lake and supplying runoff in the Southern Tibet[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(4): 737–745.]

[17] 郑绵平, 刘喜方. 青藏高原盐湖水化学及其矿物组合特征[J]. 地质学报, 2010, 84(11): 1585–1600. [Zheng Mianping, Liu Xifang. Hydrochemistry and minerals assemblages of salt lakes in the Qinghai Tibet Plateau, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(11): 1585–1600.]

[18] 李承鼎, 康世昌, 刘勇勤, 等. 西藏湖泊水体中主要离子分布特征及其对区域气候变化的响应[J]. 湖泊科学, 2016, 28(4): 743–754. [Li Chengding, Kang Shichang, Liu Yongqin, et al. Distribution of major ions in waters and their response to regional climatic change in Tibetan lakes[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(4): 743–754.]

[19] 唐金平, 张强, 胡漾, 等. 湔江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3089–3098. [Tang Jinping, Zhang Qiang, Hu Yang, et al. Groundwater chemical characteristics and analysis of their controlling factors in an alluvial fan of Jianjiang River[J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 3089–3098.]

[20] Wu W H. Hydrochemistry of inland rivers in the North Tibetan Plateau: Constraints and weathering rate estimation[J]. Science of the Total Environment, 2016, 541: 468–482.

[21] 袁浩, 郭长宝, 吴瑞安, 等. 西藏易贡高位远程滑坡研究进展与展望[J]. 地质通报, 2023, 42(10): 1757–1773. [Yuan Hao, Guo Changbao, Wu Rui'an, et al. Research progress and prospects of the giant Yigong long run-out landslide, Tibetan Plateau, China[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(10): 1757–1773.]

[22] 王哲, 赵超英, 刘晓杰, 等. 西藏易贡滑坡演化光学遥感分析与InSAR形变监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1569–1578. [Wang Zhe, Zhao Chaoying, Liu Xiaojie, et al. Evolution analysis and deformation monitoring of Yigong Landslide in Tibet with optical remote sensing and InSAR[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10): 1569–1578.]

[23] Zhou J W, Cui P, Hao M H. Comprehensive analyses of the initiation and entrainment processes of the 2000 Yigong catastrophic landslide in Tibet, China[J]. Landslides, 2016, 13(1): 43–50.

[24] 张衡, 徐团伟, 裴顺平, 等. 利用分布式光纤声传感设备开展青藏高原易贡湖浅层结构探测[J]. 地学前缘, 2021, 28(6): 227–234. [Zhang Heng, Xu Tuanwei, Pei Shunping, et al. Application of distributed acoustic sensing in structural investigation of Lake Yigong in Tibet[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 8(6): 227–234.]

[25] 刘旭东, 张瑞, 万宝. 基于Piper-PCA-MLP神经网络的矿井涌水水源识别方法研究[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(7): 50–55. [Liu Xudong, Zhang Rui, Wan Bao. Study on mine water inrush source discrimination method based on Piper-PCA-MLP Neural Network [J]. Coal Geology of China, 2022, 34(7): 50–55.]

[26] 张敏, 董少刚, 张文琦, 等. 红碱淖流域湖泊-地下水系统水化学特征及成因[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(5): 102–109. [Zhang Min, Dong Shaogang, Zhang Wenqi, et al. Hydrochemical characteristics and genesis of lake-groundwater system in the Hongjiannao Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(5): 102–109.]

[27] 杨海娇, 魏加华, 任倩慧. 柴达木盆地典型流域地表水-地下水转化关系及水化学特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1543–1554. [Yang Haijiao, Wei Jiahua, Ren Qianhui. Interaction between surface water and groundwater and hydrochemical characteristics in the typical watersheds of the Qaidam Basin[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1543–1554.]

[28] Li C Z, Li B H, Bi E P. Characteristics of hydrochemistry and nitrogen behavior under long-term managed aquifer recharge with reclaimed water: a case study in North China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 668: 1030–1037.

[29] Cui B L, Li X Y. Runoff processes in the Qinghai Lake Basin, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China: Insights from stable isotope and hydrochemistry[J]. Quaternary International, 2015, 380–381: 123–132.

[30] Wang W H, Wu T H, Zhao L, et al. Hydrochemical characteristics of ground ice in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2018, 626: 366–376.

[31] Qi H H, Ma C M, He Z K, et al. Lithium and its isotopes as tracers of groundwater salinization: A study in the southern coastal plain

of Laizhou Bay, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 878−890.

[32] 吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析[J]. 环境科学, 2015, 36(5): 1565−1572. [Lü Jiemei, An Yanling, Wu Qixin, et al. Hydrochemical characteristics and sources of Qingshuijiang River Basin at wet season in Guizhou Province[J]. Environmental Science, 2015, 36(5): 1565−1572.]

[33] 王诗语, 孙从建, 陈伟. 典型西北山地鄄绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析[J]. 环境科学, 2023, 44(3): 1416−1428. [Wang Shiyu, Sun Congjian, Chen Wei. Analysis of water chemistry characteristics and hydraulic relationships of different water bodies in typical mountain-oasis systems in the Northwest Inland Area[J]. Environmental Science, 2023, 44(3): 1416−1428.]

[34] 李祥志, 曹文庚, 李英, 等. 含氟地下水的危害、治理技术现状与进展[J/OL]. 中国地质:1−33. [2023−10−08]. [Li Xiangzhi, Cao Wengeng, Li Ying, et al. Harmfulness of fluorine-bearing groundwater and its current situation and progress of treatment technology[J/OL]. Geology in China:1−33. [2023−10−08].]

[35] Li Z J, Yang Q C, Yang Y S, et al. Isotopic and geochemical interpretation of groundwater under the influences of anthropogenic activities[J]. Journal of Hydrology, 2019, 576: 685−697.

[36] Zhao G, Li W, Li F, et al. Hydrochemistry of waters in snowpacks, lakes and streams of Mt. Dagu, eastern of Tibet Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2018, 610−611: 641−650.

[37] 艾力哈木·艾克拉木, 周金龙, 张杰, 等. 伊犁河谷西北部地下水化学特征及成因分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 504−512. [Ailihamu Aikelamu, Zhou Jinlong, Zhang Jie, et al. Chemical characteristics and genesis analysis of groundwater in northwest Yili River Valley[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 504−512.]

[38] 刘亚磊. 干旱内陆盆地地下水咸化与蒸发−累盐相互作用机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019. [Liu Yalei. Groundwater Salinization Mechanism and Interaction Processes of the Evaporation and Salt Accumulation in An Arid Inland Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019.]

[39] 王明国, 李敬杰, 梁倩. 藏东热曲水化学特征及物质来源研究[J]. 人民长江, 2023, 54(2): 120−126. [Wang Mingguo, Li Jingjie, Liang Qian. Hydrochemical characteristics and material sources of Requ River in eastern Tibet[J]. People's Yangtze River, 2023, 54(2): 120−126.]

[40] 刘元晴, 周乐, 吕琳, 等. 牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2023, 44(3): 1429−1439. [Liu Yuanqing, Zhou Le, Lü Lin, et al. Hydrochemical characteristics and control factors of pore-water in the middle and upper reaches of Muwen River[J]. Environmental Science, 2023, 44(3): 1429−1439.]

[41] Gan Y Q, Zhao K, Deng Y M, et al. Groundwater flow and hydrogeochemical evolution in the Jianghan Plain, Central China[J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(5): 1609−1623.

[42] Thomas J, Joseph S, Thrivikramji K P. Hydrochemical variations of a tropical mountain river system in a rain shadow region of the southern Western Ghats, Kerala, India[J]. AppliedGeochemistry, 2015, 63: 456−471.

[43] 孙厚云, 孙晓明, 卫晓锋, 等. 河北承德偏硅酸矿泉水成因模式: 岩石风化与水岩作用证据[J]. 中国地质, 2022, 49(4): 1088−1113. [Sun Houyun, Sun Xiaoming, Wei Xiaofeng, et al. Formation mechanism of metasilicate mineral water in Chengde, Hebei Province: Evidence from rock weathering and water-rock interaction[J]. Geology in China, 2022, 49(4): 1088−1113.]

[44] 丁启振, 雷米, 周金龙, 等. 博尔塔拉河上游河谷地区水化学特征及水质评价[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 829−840. [Ding Qizhen, Lei Mi, Zhou Jinlong, et al. An assessment of groundwater,surface water, and hydrochemical characteristics in the upper valley of the Bortala River[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 829−840.]

[45] 陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 等. 珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2023, 44(11): 6025−6037. [Tao Lanchu, Cun Dexin, Tu Chunlin, et al. Hydrochemical characteristics and control factors of surface water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River[J]. Environmental Science, 2023, 44(11): 6025−6037.]

[46] 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 等. 汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4440−4448. [Zhao Chunhong, Shen Haoyong, Wang Zhiheng, et al. Hydrochemical and isotopic characteristics in the surface water of the Fenhe river basin and influence factors[J]. Environmental Science, 2022, 43(10): 4440−4448.]

[47] Xiaolan W, Dilinuer A, Saimire T. Analysis of the hydrochemical characteristics and genesis of Bosten Lake, China[J]. Sustainability, 2023, 15(5): 71−85.

[48] 韩朝辉, 朱一龙, 赵超, 等. 汉中盆地西侧土关铺—大安镇一带山区泉水水化学特征及成因机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(6): 1996−2004. [Han Zhaohui, Zhu Yilong, Zhao Chao, et al. Chemical characteristics and genetic mechanism of spring water in the mountain area of Tuguanpu and Da'an Town, West Hanzhong Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2022, 52(6): 1996−2004.]

[49] 高宗军, 万志澎, 贺可强, 等. 大汶河流域中上游地区岩溶地下水水化学特征及其控制因素分析[J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 264−272. [Gao Zongjun, Wan Zhipeng, He Keqiang, et al. Hydrochemical characteristics and controlling factors of karst groundwater in middle and upper reaches of Dawen River basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5): 264−272.]

[50] Maurya P, Kumari R, Mukherjee S. Hydrochemistry in integration with stable isotopes($\delta^{18}O$ and δD) to assess seawater intrusion in coastal aquifers of Kachchh district, Gujarat, India[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2019, 196: 42−56.

[51] 郭艺, 甘甫平, 闫柏琨, 等. 青藏高原西南地区地表水水化学同位素特征及控制因素分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(6): 96−107. [Guo Yi, Gan Fuping, Yan Baikun, et al. Hydrochemical-isotopic characteristics of surface water and its controlling factors in southwest Tibetan Plateau[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43(6): 96−107.]

[52] 李敬杰, 连晟, 王明国, 等. 藏东多曲河流域锶富集水化学特征及控制因素[J/OL]. 环境科学: 1−14. [2023−10−08]. [Li Jingjie, Lian Sheng, Wang Mingguo, et al. Hydrochemical characteristics and control factors of strontium enrichment of the Duoqu River Basin in

Eastern Tibet[J/OL]. Environmental Science: 1-14. [2023-10-08].]

[53] 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 等. 喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4459-4469. [Lu Han, Zeng Yanyan, Zhou Jinlong, et al. Characteristics and origin analysis of groundwater salinity in the lower plain area of Kashgar River[J]. Environmental Science, 2022, 43(10): 4459-4469.]

[54] 李冬丽, 贺海波, 张雪程, 等. 柴达木盆地东北部巴音河小流域水化学特征及来源[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(3): 749-759. [Li Dongli, He Haibo, Zhang Xuecheng, et al. Hydrochemical characteristics and sources of small Bayin River watershed in the Northeast of Qaidam Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(3): 749-759.]

[55] Jiutan L, Zongjun G, Jianguo F, et al. Identification of the hydrochemical features, genesis, water quality and potential health hazards of groundwater in Dawen River Basin, North China[J]. Ecological Indicators, 2023, 149: 52-61.

[56] Ding H, Penghui L, Chen H, et al. Eutrophication and watershed characteristics shape changes in dissolved organic matter chemistry along two river-estuarine transects[J]. Water Research, 2022, 214: 71-83.

Hydrochemical characteristics and control factors of surface water in the Yigong Lake Basin, Tibet

SHAO Jie[1], YANG Xinjie[1], CHEN Xiqing[1], TENG Chao[1], YI Jinjun[1], DONG Meiling[1], ZHANG Zechen[1], CAO Jun[1], ZHU Ning[1], XIAO Deng[1], SUN Siyuan[1], LYU Fei[2]

(1. Cores and Samples Center of Natural＆Resources (CSCNR), China Geological Survey(CGS), Sanhe 065201, Hebei, China; 2. National Sichuan-Tibet Railway Technology Innovation Center, Chengdu 610200, Sichuan, China)

Abstract: This study examines the hydrochemical characteristics and controlling factors of surface water in the Yigong Lake Basin, southeast Tibet, through the collection of 26 groups of surface water samples. Linear trend diagrams, Gibbs diagrams, and Piper diagrams of the main ions in the water sample points were drawn. Moreover, correlation analysis, linear trend analysis, mathematical statistics, and ion ratio were used to analyze the surface water’s main ion characteristics and controlling factors in the study area, unveiling its material sources. The results show that the predominant cations in the Yigong Lake Basin surface area were Ca^{2+} and Mg^{2+}, while K^+ and Na^+ levels were relatively low. The hierarchy of cation content was Ca^{2+}>Mg^{2+}>Na^+>K^+. Among anions, HCO_3^-, SO_4^{2-}, and Cl^- dominated, with relatively low levels of NO_3^- and F^-. The hierarchy of anion content was HCO_3^- > SO_4^{2-} >Cl^- > NO_3^- >F^-, and the concentration value of H_3SiO_2 maintained a steady fluctuation around 6.9 mg/L. The pH value consistently ranged between 7.84 and 8.37, indicating weak alkalinity. The three main ions in the surface water of the Yigong Lake Basin were Ca^{2+}, Mg^{2+}, and HCO_3^-, and the hydrochemical types were mainly HCO_3-Ca · Mg or HCO_3-Ca. Rock leaching was the primary controlling factor, with minimal influence from cation-alternating adsorption, evaporation, or human activities on water concentration.

Keywords: water chemistry; correlation analysis; material source; Yigong Lake Basin